

**AFPP – ONZIÈME CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR LES MALADIES DES PLANTES
TOURS – 7 AU 9 DÉCEMBRE 2015**

**PHÉNOTYPAGE AU CHAMP DES CÉRÉALES POUR LA FUSARIOSE DE L'ÉPI PAR ANALYSE
AUTOMATIQUE D'IMAGE**

F. SERRE⁽¹⁾, M. FAURE⁽¹⁾, M. ABADI⁽²⁾, P. DESRAY⁽¹⁾, S. ROCHE⁽¹⁾, M. JOANNIN⁽¹⁾, M. VINOT⁽¹⁾, S. PETIT⁽²⁾,
D. TOURVIEILLE de LABROUHE⁽¹⁾

⁽¹⁾ INRA – UE PHACC 1375, 5 chemin de Beaulieu, 63039 Clermont-Ferrand (France)
denis.tourvieille@clermont.inra.fr

⁽²⁾ VEODIS-3D, 8 allée Evariste Galois, Hôtel d'entreprise Pascalis, 63000 Clermont-Ferrand (France)
stephane.petit@veodis-3d.com

RÉSUMÉ

Dans un contexte de développement de phénotypage végétal à l'aide d'outils d'imagerie, il a été développé un outil de phénotypage des céréales pour le comportement vis-à-vis de la fusariose de l'épi. Le protocole mis en œuvre est fondé sur l'analyse de photographies prises à partir d'un simple reflex numérique complémenté par des éclairages flash. Les lignes d'épis sont photographiées de façon latérale sur un fond homogène. Deux algorithmes sont mis en œuvre. « SegEpis » qui est fondé sur la texture, permet d'isoler les seuls pixels appartenant aux épis avec une précision par rapport à la segmentation manuelle de 94 % sur blé, de 89 % sur triticale et de 86 % sur l'orge. « SegFusa », basé sur la couleur, permet de calculer sur les photographies segmentées avec « SegEpis », la surface des épis présentant des symptômes de fusariose avec une précision par rapport à la segmentation manuelle, de 80 %. Les pourcentages de tissus malades obtenus sur 60 photographies de blé sont fortement corrélés (coefficient de corrélation $R = 0,968$) avec les notes attribuées par des observations visuelles d'expert réalisées sur les mêmes photographies. Une validation du protocole a été réalisée sur un essai portant sur 220 génotypes de blé tendre infectés en plein champ.

Mots-clés : Céréales – Fusariose de l'épi – Phénotypage – Traitement et analyse d'images – Plein champ.

ABSTRACT

This paper describes a method to phenotype cereal genotypes for their reaction to fusarium head blight based on processing and analysis of photographs taken by a digital reflex camera with flash lighting. The cereal ears are photographed laterally using a homogeneous background. With the goal of determining the percent of tissues invaded by *Fusarium*, two algorithms were developed. « SegEpis » based on texture, makes possible to isolate only the pixels belonging to the ears with an accuracy of 94% in wheat, 89% in triticale and 86% in barley compared with manual segmentation. « SegFusa » calculates proportion of ear area showing fusarium symptoms, with an accuracy of 80% compared with manual segmentation. The percentages of diseased tissue (obtained on 60 wheat photographs) are closely correlated ($R = 0.968$) with ratings from visual observations made by experts on the same photographs. This methodology was validated by further tests on 220 wheat genotypes infected in the field.

Keywords: Cereal, fusarium head blight, plant phenotyping, images processing and analysis, field conditions.

INTRODUCTION

Les champignons responsables de la fusariose de l'épi (FHB) entraînent des pertes de rendement, une qualité du grain moindre et synthétisent des mycotoxines nocives pour l'homme et l'animal. La maladie, retrouvée sur l'ensemble des continents, affecte toutes les céréales et est causée par un complexe parasitaire d'espèces appartenant aux genres *Fusarium* et *Microdochium*. Les ascospores dispersées par le vent ou les conidies présentes sur le sol et transportées lors des pluies infectent l'épi autour du stade mi-anthèse (stade le plus sensible). Cette maladie se manifeste par une période de quelques jours sans symptômes puis, en fonction de la progression du champignon, par un dessèchement prématuré des épillets voire des épis entiers. La fusariose de l'épi qui engendre une perte de rendement limitée à 0,2t/h/an en France a un impact plus problématique sur la qualité sanitaire des grains du fait de contamination par les mycotoxines (Olivier *et al*, 2008). Plusieurs douzaines de pays incluant les plus grands producteurs de céréales comme le Canada, la Chine, l'Union Européenne, les USA, l'Inde, le Japon ou encore la Russie ont mis en place des seuils réglementaires de déoxynivalénol (DON) dans les produits alimentaires (FAO, 2010). Dans l'Union Européenne, le seuil maximal de DON accepté pour l'alimentation animale est de 1,25 mg kg⁻¹, alors que les produits destinés à l'alimentation humaine peuvent contenir au maximum 0,75 mg kg⁻¹ (Règlement N° 1126/2007 de la commission du 28 septembre 2007). Même si l'importance des contaminations est fortement liée aux conditions environnementales et notamment à la présence de périodes humides autour de la période d'infection (Cowger *et al*, 2009 ; Siou, 2013), une étude réalisée en 2012 (Sondage Bayer, 253 agriculteurs), montre que les agriculteurs considèrent le FHB comme la deuxième maladie à éradiquer des cultures de blé.

Parmi les moyens de lutte identifiés pour limiter les symptômes et pour réduire la contamination des grains par les mycotoxines, l'utilisation de variétés résistantes apparaît essentielle. Cette dernière est le moyen le plus respectueux de l'environnement pour combattre la fusariose de l'épi et représente donc une solution privilégiée par la filière céréalière. Aujourd'hui, les phénotypes FHB réalisés par les sélectionneurs sont effectués par examen visuel. Les experts attribuent aux parcelles une note globale de 1 à 9 selon le niveau de l'attaque (Michel, 2001). Cette méthode visuelle d'évaluation se révèle sujette à diverses interprétations dépendant principalement des experts et n'est pas compatible avec les objectifs de phénotypage haut-moyen débit. Afin d'y remédier et de fournir aux évaluateurs une appréciation fine des parcelles, ce travail propose une méthode qui repose sur l'utilisation de capteurs optiques (imagerie) afin de diagnostiquer la fusariose directement au niveau de microparcelles préalablement infectées et cela sans aucun dégât sur la culture.

L'utilisation des méthodes d'analyse d'images en agriculture est en plein essor, que ce soit pour caractériser des couverts végétaux (Abadi et Grandchamp, 2009 ; Wu et When, 2009 ; Qazi *et al*, 2011), pour déterminer des caractères agronomiques (Benoit *et al*, 2013), pour détecter la présence de maladies sur feuille (Han et Cointault, 2013) soit pour quantifier les mauvaises herbes (Asnor *et al*, 2007 ; Bossua *et al*, 2009 ; Xavier *et al*, 2010). Récemment, Busemeyer *et al* (2013) ont développé une plate-forme multicapteurs de phénotypage permettant d'étudier certains caractères des plantes céréalières tels que la hauteur, la densité, la teneur en humidité, le stade, etc. Cependant, les études ayant pour sujet le phénotypage de la fusariose de l'épi traitée par analyse d'images se réalisent uniquement en conditions contrôlées de laboratoire (Cadot *et al*, 2015 ; Lasserre-Zuber *et al*, 2015a).

Le but est de créer un outil permettant un phénotypage moyen/haut débit plein champ qui puisse s'affranchir des conditions météorologiques lors de la prise d'images. Pour cela, l'objectif de ce travail est d'automatiser le protocole de phénotypage FHB *in campo* en développant une plate-forme d'acquisition d'images et des outils de traitement et d'analyse spécifiques pour ce type de données. Pour la mise en œuvre du protocole d'analyse, nous avons en premier lieu, cherché à

segmenter les photographies afin de ne conserver que les pixels appartenant aux organes étudiés (les épis). En second lieu, nous avons quantifié la surface des épis présentant des symptômes de fusariose. L'approche développée a été validée dans un premier temps sur une série de photographies segmentées manuellement par des experts, puis sur une autre série acquise sur le panel de variétés de blés considérés comme élite du programme international BreedWheat (Lasserre-Zuber *et al*, 2015a et b).

MATÉRIEL ET MÉTHODE

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Choix du matériel végétal

Pour le blé, le matériel végétal à l'étude correspond au panel "biotech" étudié dans le cadre du projet d'investissement d'avenir BreedWheat. Il est formé de 220 cultivars élités de blé tendre. Obtenus entre 1974 et 2012 par une quinzaine d'obteneurs différents, ces cultivars sont principalement d'origine européenne. Ce panel se structure génétiquement en 5 groupes par l'appareillement avec des variétés ayant marqué l'histoire de la sélection (Apache, Charger et Soissons), par l'origine géographique (Nord vs. Sud) et par certains traits morphologiques (Lasserre-Zuber *et al*, 2015a et b). Pour l'orge (20 cultivars) et le triticale (10 cultivars) nous avons utilisé des panels représentatifs de la diversité morphologique des espèces, fournis par les sociétés Secobra et Agriobtentions respectivement.

Dispositif expérimental

L'essai BreadWheat réalisé à l'INRA à Clermont-Ferrand compte 4 blocs dont un non infecté (témoins). La parcelle élémentaire compte 3 lignes d'1m50 espacées de 20 cm. Chaque parcelle est bordée de 3 lignes de bordure d'un même génotype peu sensible aux maladies (Renan). Seule une des 3 répétitions infectées a été analysée dans le cadre de ce travail. Les infections sont réalisées par contamination artificielle avec la souche *Fg1* de *Fusarium graminearum* : l'application se réalise directement sur les épis au stade mi-anthèse en brumisant environ 500 ml d'inoculum de *F. graminearum* concentré à 10^6 spores/ml d'eau sur les trois lignes de la microparcelle. En cas de nécessité, une irrigation en couverture totale permet d'assurer un minimum de 10 mm de précipitation par semaine entre le début de l'épiaison de la variété la plus précoce et les dernières notations.

Dispositif d'acquisition d'images

Un mètre-linéaire d'épis est photographié, ce qui permet de ne pas prendre en considération des épis des plantes des extrémités de chaque ligne et d'avoir un nombre d'épis représentatif de la parcelle. Les photographies sont obtenues à l'aide d'un appareil photo plein format (Canon EOS 5D Mark II) disposant d'un objectif de 20 mm. L'éclairage est assuré par des flashes (Canon Speedlite 430 EX II) commandés par un transmetteur infrarouge (Canon Speedlite ST-E2).

La prise de vues est réalisée en plaçant les épis devant un fond isolant la ligne d'intérêt. Un lecteur de code à barres permet de dénommer les photographies. Ainsi, aucun prétraitement n'est apporté aux images avant leur analyse.

Afin de pouvoir calculer pour chaque génotype la sévérité de la maladie, deux prises de vues sont réalisées sur chaque parcelle : la première 350 °J après l'infection et la seconde à 450 °J.

PROCÉDURES D'ANALYSE DES IMAGES

La segmentation d'images est un problème de vision bas-niveau, où le nombre d'applications n'a cessé d'augmenter. Cependant, l'automatisation de cette étape reste une phase complexe en particulier lorsque les images sont prises dans des conditions peu ou non contrôlées. En effet, transcrire le mode de discrimination appliqué par le système visuel humain n'est pas une tâche facile. Notre protocole d'acquisition permet d'atténuer les effets de prises de vues dans des conditions réelles.

A partir des images obtenues, nous avons construit des algorithmes spécifiques pour, d'une part, isoler les épis et, d'autre part, estimer le pourcentage de la surface d'épis atteinte par la fusariose. Ces algorithmes ont pour point commun d'utiliser les informations visuelles locale et globale des images.

Segmentation des épis

Pour extraire de l'image les pixels appartenant aux épis, nous avons développé un algorithme de segmentation nommé « SegEpis » exploitant principalement l'information texture contenue dans les images. En effet, les feuilles et les tiges des plantes se caractérisent par une texture relativement lisse et homogène contrairement aux épis qui forment des structures régulières. Pour décrire plus efficacement ces caractères, nous avons calculé les descripteurs de texture à l'échelle des superpixels plutôt qu'à celle, plus dense, des pixels. Cette étape permet de faire des traitements plus rapides et requérant une capacité mémoire moindre. Ensuite, un algorithme de type SVM (Support Vector Machine) a été utilisé afin de classer les superpixels comme appartenant à de l'épi ou non (Chih-Chung et Chih-Jen, 2001). Enfin, le résultat de la classification a été exploité par une technique utilisant les algorithmes de graphe cuts (Boykov et Funka-Lea, 2006) afin d'améliorer la segmentation.

Segmentation et quantification des zones fusariées

Une fois les épis extraits, nous avons développé un algorithme nommé « SegFusa » permettant de quantifier les zones atteintes par la fusariose. Visuellement, la seule particularité de la fusariose est qu'elle modifie la couleur de l'épi pour le faire tendre vers des tons blanchâtres, jaune-orangé, voire marron. La couleur est donc le seul critère pouvant, sur une photographie RVB (Rouge Vert Bleu), discriminer les tissus fusariés des tissus sains. Différentes approches de segmentation d'images exploitant l'information spectrale ont été développées ailleurs (Bonesmo *et al*, 2004 ; Noh *et al*, 2005 ; Noble et Brown, 2009 ; Meurie *et al*, 2010). Pour segmenter la fusariose, nous nous sommes inspirés de la méthode introduite par Van de Weijer *et al* (2009). Elle consiste à déterminer la couleur d'un pixel parmi une palette de couleurs définie au préalable. Le principe est de calculer pour chaque pixel de l'image la probabilité qu'il corresponde aux couleurs de la palette. La couleur du pixel est ensuite égale à la couleur qui a la probabilité la plus grande. Les zones fusariées sont ensuite quantifiées en calculant le pourcentage de pixels reconnus comme « malades » par l'algorithme. Pour chaque photographie, celui-ci est égal au nombre de pixels reconnus comme appartenant à une zone malade divisé par le nombre de pixels correspondant à de l'épi.

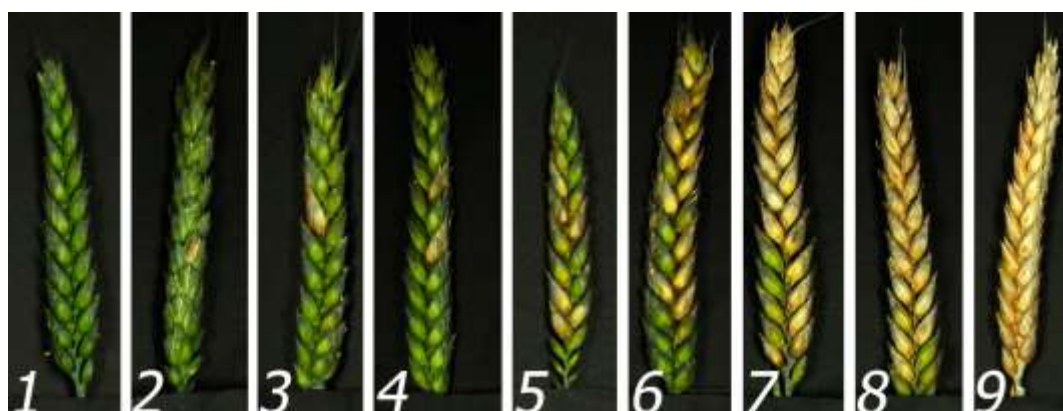
NOTATION DE LA MALADIE

Notation visuelle d'expert (1-9)

Cette notation est classiquement réalisée sur une échelle entre 1 et 9 (1 pour les épis sans symptôme et 9 pour les épis entièrement morts). La figure 1 montre l'image correspondant à chaque note. En pratique, la note finale de chaque génotype correspond à la moyenne des notes obtenues par les épis observés.

Figure 1 : Notation (1 à 9) couramment utilisée pour quantifier la sévérité des symptômes de la fusariose de l'épi des céréales.

Ratings (from 1 to 9) commonly used to quantify the severity of FHB symptoms on cereal ears.



Sévérité des symptômes par analyse d'images

L'algorithme « SegFusa » quantifie le nombre de pixels correspondant aux épis qui présentent une couleur caractéristique de la maladie. Cependant, certains phénotypes, surtout 450°J après la floraison, peuvent présenter naturellement une coloration difficile à distinguer des tissus malades ce qui entraîne une surévaluation du pourcentage de tissus malades. Afin de remédier à cette difficulté, le même jour et dans les mêmes conditions, une photographie est réalisée sur les parcelles de la répétition non infectée. Ces photographies sont analysées comme celles qui sont obtenues sur les parcelles infectées par les algorithmes « SegEpis » et « SegFusa » afin de définir le taux de pixel (faux positifs) correspondant pour chaque génotype au bruit de fond.

La sévérité est alors définie comme le pourcentage de pixels décolorés de la répétition infectée dont on soustrait le pourcentage de pixels décolorés de la répétition témoin non infectée.

RESULTATS

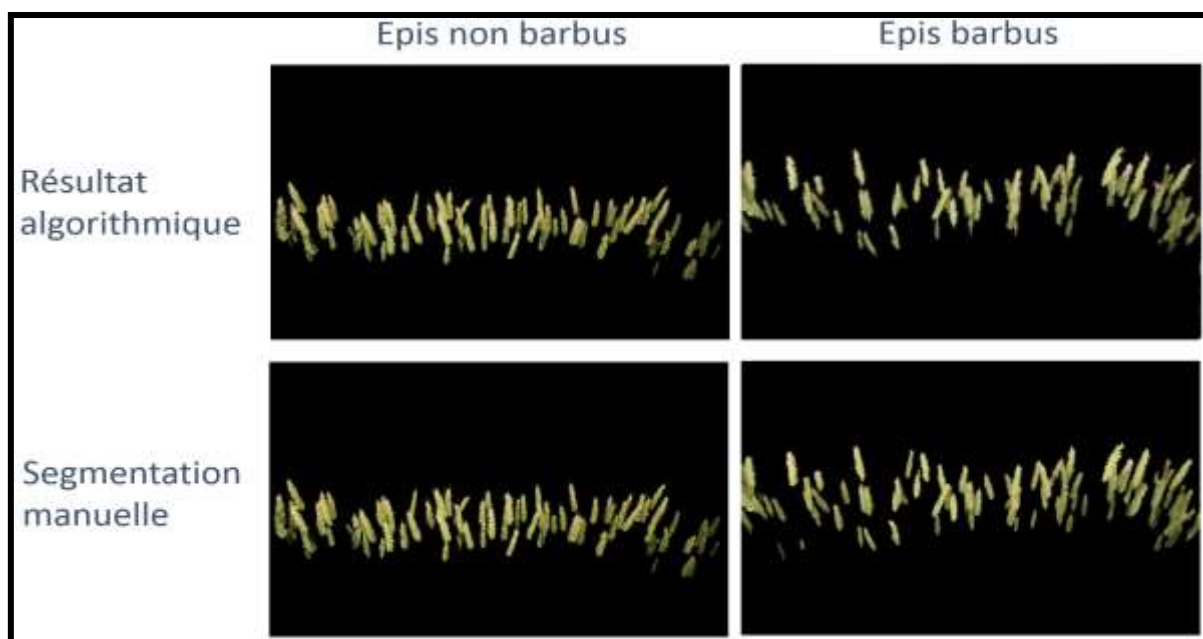
COMPARAISON ENTRE SEGMENTATIONS ALGORITHMIQUES ET D'EXPERT

Dans cette section, nous présentons une comparaison quantitative et qualitative entre les résultats obtenus par nos algorithmes et la vérité experte sur différents types de céréales : blé tendre barbu et non barbu, triticales, orge à 2 rangs et escourgeon.

Segmentation des épis

L'algorithme « SegEpis » a été appliqué sur les trois céréales que nous avons eues à disposition. Cela a permis d'étudier la robustesse face aux différents phénotypes. Pour évaluer la qualité de discrimination des épis, nous avons confronté les résultats obtenus avec les segmentations manuelles réalisées par les experts. Les taux de bonne segmentation, c'est-à-dire les taux de pixels correspondant à de l'épi et qui ont été bien reconnus comme appartenant à de l'épi par l'algorithme, varient selon les espèces. Pour le blé (Figure 2), les taux de bonne segmentation sont de l'ordre de $96 \% \pm 2 \%$ et $91 \% \pm 2 \%$ respectivement pour les blés non barbues et les blés barbues. En ce qui concerne le triticale et l'orge, les taux de bonne segmentation sont respectivement $89 \% \pm 5 \%$, $86 \% \pm 4 \%$. Ces taux ont été obtenus à partir de 10 photographies par type de céréale (6 pour le triticale).

Figure 2 : Résultats des segmentations des épis pour deux types de blé tendre en utilisant « SegEpis ». Results of manual segmentation of ears with those from the algorithm « SegEpis » for awned and non-awned bread wheat genotype

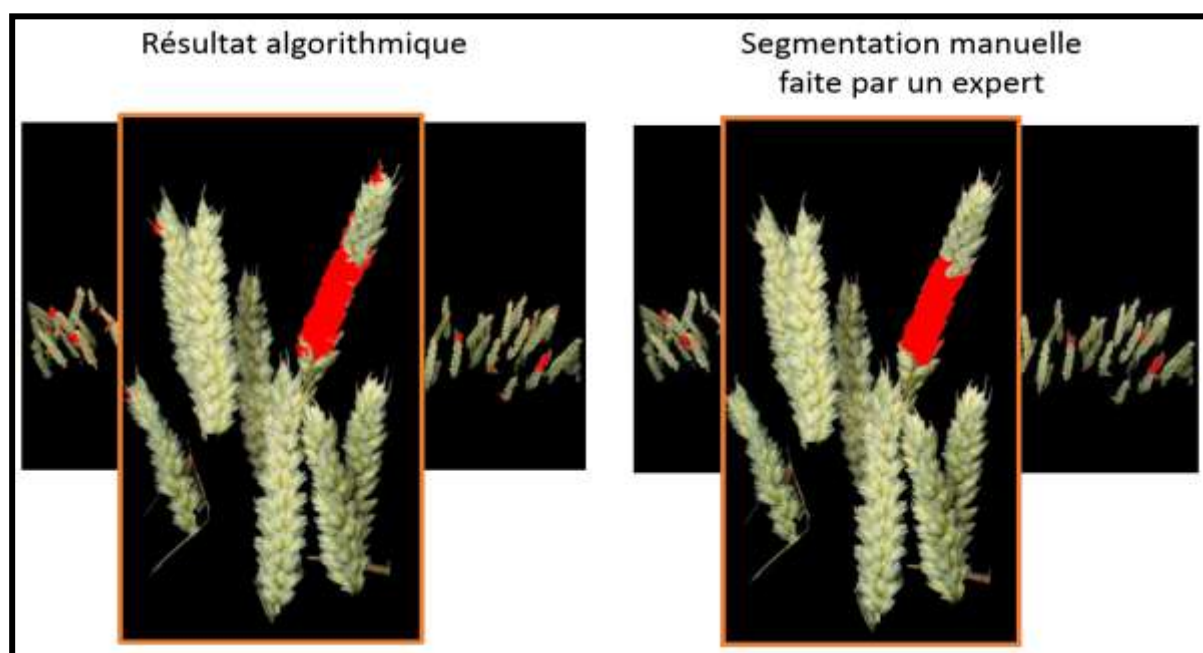


Quantification des zones fusariées

Sur 60 photographies de blé tendre analysées (30 génotypes à 350°J et à 450°J après infection), les résultats de l'algorithme « SegFusa » ont été comparés aux résultats des segmentations manuelles réalisées par un expert. Le taux de similarité est de $80\% \pm 10\%$ (Figure 3).

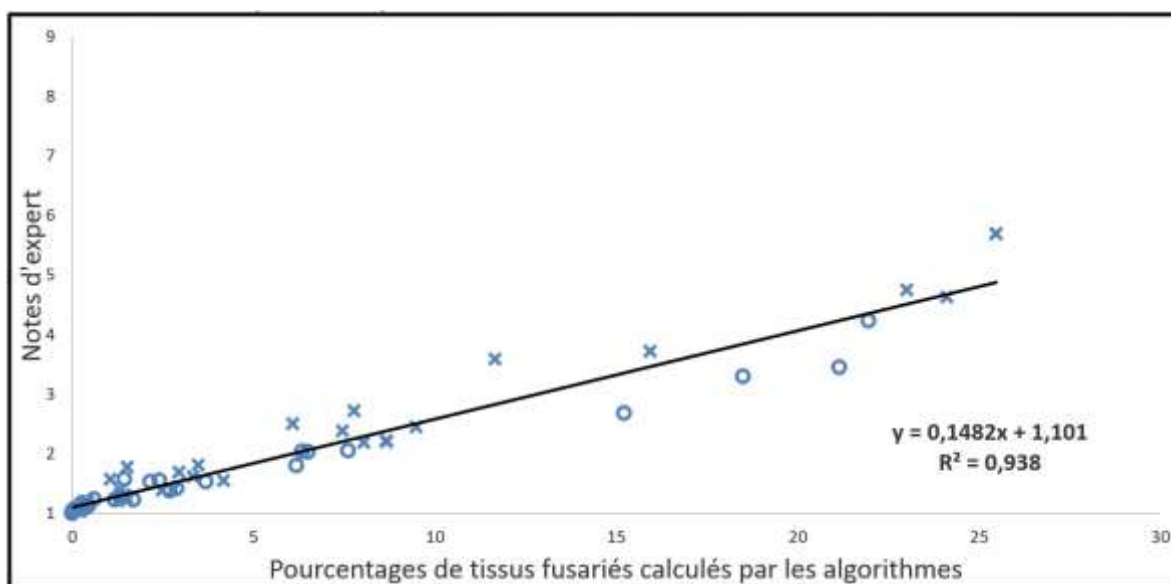
Figure 3 : Comparaison des résultats des segmentations algorithmiques « SegFusa » et manuelle sur blé tendre.

Comparison of expert manual observation of *Fusarium* infection with segmentation by the algorithm "SegFusa"



Ce taux pas très élevé s'explique par la présence de tissus sains naturellement décolorés tels que les extrémités des épillets ou par une maturité précoce pour les photographies prises à 450 °J après la floraison. Pour cela, nous avons retranché des taux de pixels classés comme appartenant à des tissus malades par l'algorithme « SegFusa », les taux de pixels également reconnus par « SegFusa » sur les mêmes photographies après suppression par un expert des pixels correspondant aux symptômes de FHB. Les résultats obtenus sur 60 photographies mettent en évidence une très bonne corrélation ($R = 0,968$) entre les taux issus des algorithmes et les notes données par les experts (Figure 4).

Figure 4 : Comparaison des pourcentages de surface fusariée calculés par les algorithmes avec les notes d'experts obtenues sur 60 photographies de blé (○ à 350 °J et × à 450 °J après infection).
Comparison of the percentage areas infected by *Fusarium* calculated by algorithm with expert observations on 60 photographs of wheat ears (○ at 350 °C day and × at 450 °C day after infection).



VALIDATION DU PROTOCOLE D'ANALYSE

Les résultats produits par l'analyse automatique ont été comparés à ceux qui ont été obtenus dans le cadre de l'expérimentation BreedWheat sur les mêmes parcelles mais pas sur les mêmes lignes. Chaque parcelle (220 génotypes) est caractérisée par :

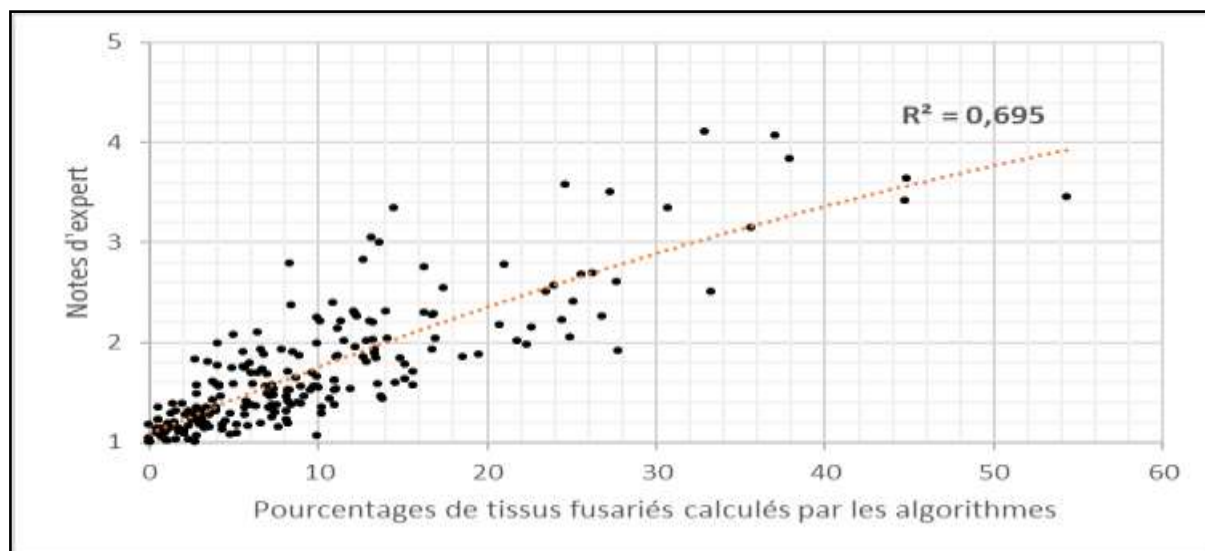
- une note comprise entre 1 et 9 (données Breedwheat obtenues sur 24 épis par Lasserre-Zuber *et al*, 2015a) ;
- un pourcentage de tissu malade (données algorithmiques obtenues sur photographies prises au champ ≈ 50 épis).

Ces données calculées pour 400 °J correspondent à la moyenne entre les valeurs obtenues à 350 °J et à 450 °J.

Le niveau d'attaque observé sur cette expérimentation s'est avéré relativement peu élevé puisque la note moyenne obtenue par les 220 génotypes est égale à 1,72. En effet, trois quarts des génotypes ont une note moyenne inférieure à 2 et les génotypes les plus sensibles présentent une note moyenne légèrement supérieure à 4. Malgré ce faible niveau de symptôme, les deux séries de données montrent un coefficient de corrélation élevé : $R = 0,831$ (Figure 5). Cela apparaît d'autant plus intéressant que les observations, si elles ont été réalisées sur les mêmes parcelles, n'ont pas été effectuées sur les mêmes plantes alors que les taux d'épis touchés pouvaient varier d'une ligne à l'autre.

Figure 5 : Comparaison du taux de FHB calculé (« SegEpis » + « SegFusa ») par phénotypage automatique sur photographies prises *in campo* sans prélèvement (50 épis), de 220 parcelles (génotypes) de blé tendre, avec la notation experte réalisée après prélèvement (24 épis).

Comparison of the level of FHB attack calculated by automatic phenotyping ("SegEpis" and SegFusa") of photographs taken on plants in the field (220 plots, with 50 ears/plot) and that estimated by expert observations on harvested ears (24 ears/plot)



Si les résultats obtenus avec notre protocole d'analyse peuvent être moins précis pour les faibles niveaux de symptômes (puisque c'est une approche à 2 dimensions alors que la notation a été réalisée en 3 dimensions et que les notes 2 et 3 sont le plus souvent visibles que d'une seule face des épis), nous supprimons les erreurs de notation des experts pour les valeurs moyennes. En effet, la comparaison des notes attribuées par trois experts sur environ 2000 épis, montre qu'il est rare d'avoir un consensus entre tous les experts. Cette mesure de la sévérité des symptômes est liée à la subjectivité de la notation expert et pose la question de la pertinence de cette dernière pour un jugement fin des génotypes. Cela est particulièrement vrai pour les notes centrales qui positionnent les cultivars en assez résistants ou assez sensibles. (Tableau I).

Tableau I : Fréquence d'accord entre les notations de fusariose attribuées à des épis de blé par trois experts.

Frequency of concurring assessment of FHB attack on wheat ears by 3 experts.

Classes de symptômes (notes)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nombres d'épis observés par classe	251	251	190	222	221	222	216	170	164
Fréquence d'accord entre les trois experts(%)	85	46	35	17	4	4	19	58	76

DISCUSSION

Les difficultés de la sélection des céréales vis-à-vis de la fusariose (Trottet et Pradel, 2008) imposent de disposer de protocoles fiables pour lesquels le mode de mesure de la résistance doit être rapide et notateur indépendant. Les méthodes de notation sont nombreuses et différentes échelles ont été publiées (Rudd *et al*, 2001). Les méthodes visant à une observation synthétique du comportement, des notations globales fondées sur une échelle de 1 à 9 (ou 0 à 9) ou sur une estimation globale du pourcentage d'épillets fusariés sont pratiquées pour l'observation d'un grand nombre de génotypes (Caron *et al*, 2008). Celles-ci ont besoin du passage répété d'expert sur la parcelle d'expérimentation. Nos protocoles d'acquisition et d'analyse des images ne nécessitent pas la présence de spécialistes et permettent de créer une base de données toujours exploitable. Cette simplification permet de limiter les imprécisions de quantification de la fusariose. Afin de comparer

tous les génotypes sur le même critère : il sera nécessaire de réaliser deux séries de photographies, une entre 350 et 380°J, l'autre entre 400 et 430 °J après infection. Cela conduit à photographier les parcelles entre 3 et 5 jours d'intervalles. Avec ces deux données, pour chaque parcelle, la sévérité de l'infection à 400 °J et la vitesse de progression des symptômes seront estimées. Elles serviront pour la comparaison entre tous les génotypes.

Dans nos expérimentations, la même note globale peut être obtenue avec quelques épis très fortement touchés (notes 8 et 9) ou avec de très nombreux épis faiblement touchés (notes 2 et 3). Il y a confusion de deux mécanismes de résistance : de type 1 = résistance à la pénétration et de type 2 = résistance à l'extension des symptômes (Schroeder et Christensen, 1963) alors que ceux-ci doivent être pris en considération séparément par le sélectionneur. L'algorithme « SegFusa » devra être modifié afin de fournir pour chaque image non plus un seul pourcentage relatif à la sévérité mais, après découpage, une incidence permettant d'avoir une information sur ces deux types de résistance.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Avec ces deux algorithmes « SegEpis » et « SegFusa », les sélectionneurs disposent d'un outil fiable de phénotypage des céréales pour leur comportement à la fusariose de l'épi. Sa mise en œuvre ne nécessite pas de matériel très sophistiqué puisque les photographies sont réalisées avec du matériel grand public. Les prises de vues sont rapides et doivent permettre aux expérimentateurs d'homogénéiser au mieux les critères de saisie des données. En particulier, l'expérimentateur se doit d'être rigoureux pour les dates d'observations, car les symptômes peuvent évoluer très rapidement ce qui peut conduire à des inversions de classement si les stades ne sont pas identiques entre les génotypes étudiés. Les vitesses de traitement algorithmique des images, dans leur version actuelle et avec un ordinateur de bureau grand public, permettent d'analyser 200 images par 24 heures, ce qui apparaît bien souvent comme suffisamment rapide.

Nous souhaitons développer un vecteur (phénotypette) adapté à l'expérimentation « maladies » petite parcelle en conditions contrôlées (brumisations). Ce vecteur doit pouvoir circuler facilement dans l'essai pour accéder aux parcelles ayant atteint le bon stade d'observation pour y positionner l'outil d'acquisition d'images latéralement. Les vecteurs qui sont actuellement développés ne sont pas satisfaisants, soit parce qu'ils ne permettent pas de prendre de photographies latérales, soit parce qu'ils sont trop intrusifs ou soit parce qu'ils ne peuvent pas circuler dans des essais sous irrigation.

Enfin, cette approche a également l'avantage de fournir une base de données photographiques exploitable bien après l'expérimentation. Nous envisageons la construction d'algorithmes permettant de quantifier le rendement sur des photographies traitées par « SegEpis », en combinant des informations sur le nombre d'épis par mètre, la taille des épis voire le nombre d'épillets par épis. Ces données apporteraient un réel plus aux programmes des sélectionneurs qui sont dans l'obligation de gérer plusieurs centaines de génotypes.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la collaboration « Fusatech » qui, en plus de l'INRA et de Véodis3D, rassemble les sélectionneurs privés : Limagrain, Secobra et AgriObtentions. Cette collaboration est animée par CéréalesVallée.

BIBLIOGRAPHIE

- Abadi M., Grandchamp E., 2009 – Classification de couverts végétaux par analyse de textures couleurs d'images satellites haute résolution. *Traitement du signal*, 26, 2, 175-185.
- Asnor J., Aini Hussain I., Marzuki Mustafa M., 2007 - Weed image classification using Gabor wavelet and gradient field distribution. *Elsevier computers and electronics in agriculture*, 66, 53-61.
- Benoit L., Belin É., Chapeau-Blondeau F., Rousseau D., Demilly D., Ducournau S., Dürr C., 2013 - Système de vision et d'analyse d'images pour le suivi automatisé du développement de semences et de plantules. In *Quatrième Journées des Démonstrateurs en Automatique* (p. 38).
- Bonesmo H., Kaspersen K., Bakken A., 2004 - Evaluating an Image Analysis System for Mapping White Clover Pastures. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil and Plant Science*, 54, 2, 76-82.

Bossua J., Géa Ch., Jones G., Truchet F., 2009 - Wavelet transform to discriminate between crop and weed in perspective agronomic images. *Science Direct computers and electronics in agriculture*, 6, 5, 133–143.

Boykov Y., Funka-Lea G., 2006 - Graph cuts and efficient n-d image segmentation. *International Journal of Computer Vision*, 70, 2, 109–131.

Bussemeyer L., Mentrup D., Möller K., Wunder, E., Alheit, K., Hahn, V., Peter Maurer H., Reif J.-C., Würschum T., Müller J., Rahe F., Ruckelshausen, A., 2013 - BreedVision - A Multi-Sensor Platform for Non-Destructive Field-Based Phenotyping in Plant Breeding. *Sensors*, Basel (Switzerland), 13, 3, 2830-2847.

Cadot V., Vadaine R., Demilly D., Maigniel J.-P., 2015 - Multispectral camera and imaging: a new tool for assessment of wheat resistance to *Fusarium graminearum* and preliminary study for assessment of DON content. In *Book of abstracts of 13th European Fusarium Seminar, 10-14 may, Martina Franca (Italy)*, p160.

Caron D., Momont T., Mistou M.-N., Trottet M., 2008 - Comportement de variétés de blé tendre à la fusariose des épis et à l'accumulation de mycotoxines dans les grains. *Synthèse des programmes de recherches FSOV – Actes des rencontres scientifiques, 8 Janvier, Paris (France)* 52-61 (ISBN-978-2-9529-6440-1).

Chih-Chung C., Chih-Jen L., 2001 - LIBSVM: a library for support vector machines, 2001, software available at <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.

Cowger C., Patton-Ozkurt J., Brown-Guedira G., Perugini L., 2009 - Post-anthesis moisture increased Fusarium head blight and deoxynivalenol levels in North Carolina winter wheat. *Phytopathology*, 99 4, 320-327.

Han S., Cointault F., 2013 - Détection précoce de maladies sur feuilles par traitement d'images. *Oraris, Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur, juin, Cluny (France)*, <hal-00829402>.

Lasserre-Zuber P., Serre F., Joannin M., Roche S., Soudière O., Desray P., Tourvieille de Labrouhe D., Sainenac C., Langin T., 2015a - Caractérisation phénotypique d'un panel de blé tendre cultivé pour différents paramètres de la résistance à FHB. *Réunion Réseau Fusatox, 05-06 mars, INRA Bordeaux (France)*.

Lasserre-Zuber P., Sainenac C., Serre F., Soudière O., Joannin M., Roche S., Desray P., Tourvieille de Labrouhe D., Langin T., 2015b - Phenotypic characterization and identification of genomic regions associated with FHB resistance in the French elite bread wheat varieties. In *Book of abstracts of 13th European Fusarium Seminar, 10-14 may, Martina Franca (Italy)*, p. 171.

Meurie C., Lezoray O., Khoudour L., Elmoataz A., 2010 - Morphological hierarchical segmentation and color spaces. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 20, 2, 167-178.

Michel V., 2001 - La sélection de variétés de blé et de triticales résistantes aux maladies. *Revue suisse Agric.*, 33, 4, 133-140.

Noble S.D., Brown R.B., 2009 - Plant species discrimination using spectral/spatial descriptive statistics. *Image Analysis for Agricultural Products and Processes, Potsdam, Germany, August 27-28*, 82-92.

Noh H., Zhang Q., Han S., Shin B., Reum D., 2005 - Dynamic calibration and image segmentation methods for multispectral imaging crop Nitrogen deficiency sensors. *American Society of Agricultural Engineers*. 48(1): 393–401.

Olivier A., Trottet M., Lonnet P., Margalé E., Stragliatti J., Sennellart P., Regnard J.-B., Lerebourg P., Sunderwhirt S., Roumet P., 2008 - Résistance à la fusariose et mycotoxines dans les grains de blé tendre. Colloque FSOV – 29 mars, France (Paris). <http://www.fsov.org/ouverturepdf.php?file=comportement-varietes-ble-fusariose-et-accumulation-mycotoxines-show.pdf>

Qazi I.-U.-H, Alata O., Burie J.-C., Abadi M., Moussa A., Fernandez-Maloigne C., 2011 - Parametric models of linear prediction error distribution for color texture and satellite image segmentation. *Computer Vision and Image Understanding*, 115, 8, 1245-1262.

Rudd J. C., Horsley R. D., McKendry A. L., Elias E. M., 2001 - Host plant resistance genes for Fusarium head blight: sources, mechanisms, and utility in conventional breeding systems. *Crop Sci.*, 41, 620-627.

Schroeder H.W., Christensen J.J., 1963 - Factors effecting resistance of wheat to scab caused by *Gibberella zeae*. *Phytopathology*, 23, 831-838.

Siou D., 2013 - Développement épidémique de la fusariose des épis de blé et conséquences des interactions entre espèces du complexe fusarien. *Agricultural sciences. Université Paris Sud - Paris XI, French*. <NNT : 2013PA112005>. <tel-00849969>

Trottet M., Pradel B., 2008 - Sélection des céréales pour la résistance aux fusarioses et contre l'accumulation de mycotoxines dans les grains. *Le Sélectionneur Français* n°58-59, 55-68.

Van de Weijer J., Schmid C., Verbeek J., Larlus D., 2009 - Learning color names for real-world applications. *IEEE transaction, Image Processing*, 18, 1512-1523.

Wu L., Wen Y., 2009 - Weed/corn seedling recognition by support vector machine using texture features. *African Journal of Agricultural Research*, 4, 9, 840–846.

Xavier P., Artizzu B., Ribeiro A., Pajares G., 2010 - Analysis of natural images processing for extraction of agriculture elements. *Elsevier image and vision computing*, 28, 138-149.